

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОСКЕЛЕТА КОЛЕННОГО СУСТАВА С ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

М. Н. Николенко, Д. А. Котин

Новосибирский государственный технический университет
kinik33@mail.ru

Введение

Экзоскелет (от греч. $\epsilon\chi\omega$ – внешний и $\sigma\kappa\epsilon\lambda\epsilon\tau\omicron\varsigma$ – скелет) – устройство, предназначенное для восполнения утраченных функций, увеличения силы мышц человека и расширения амплитуды движений за счет внешнего каркаса и приводящих элементов [1].

Для медицинских экзоскелетов был предложен модульный принцип построения, предполагающий создание локальных активных (снабженных приводом) и пассивных экзоскелетов для каждого сустава [2]. Такой принцип построения дает возможность подбирать конфигурацию экзоскелета в зависимости от вида патологии пациента, вуалируя параметрами масса, функциональность и цена для каждого отдельного случая. В данной работе рассматривается возможность применения вентильного электропривода в электромеханическом узле коленного сустава.

Электромеханический узел экзоскелета коленного сустава

Устройство рассматриваемого экзоскелета приведено в работе [2].

Функциональная схема системы представлена на рис. 1.

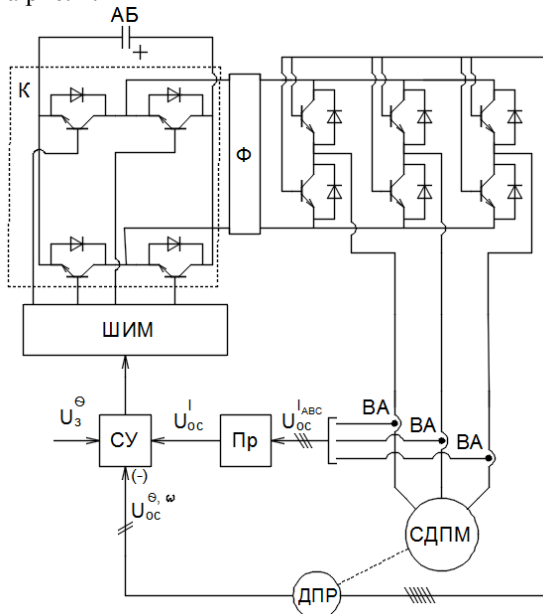


Рис. 1. Функциональная схема электромеханического узла экзоскелета коленного сустава с вентильным электроприводом

В вентильном двигателе коммутация секций (фаз) обмотки статора осуществляется с помощью полупроводникового коммутатора, управляемого сигналами, позволяющими выявить положение

ротора по отношению к статору [3]. Эти сигналы вырабатываются специальным датчиком положения ротора (ДПР). В нашем случае, в качестве ДПР выступают датчики Холла, установленные в статор двигателя непосредственно на заводе-изготовителе. В зависимости от положения ротора к одной из обмоток статора приложено положительное напряжение питания, и данная обмотка притягивает ротор двигателя, к другой обмотке прикладывается отрицательное напряжение питания, данная обмотка отталкивает ротор двигателя. Третья фаза не участвует в формировании электромагнитного момента, за исключением коммутационного интервала, в течение которого одна фаза выходит из работы, а в очередной обмотке начинает протекать ток.

Такое построение силовой части обеспечивают прямые механические характеристики, как у двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и высокую надежность электропривода в связи с отсутствием коллекторного узла. Такие двигатели обладают высокой надежностью, большими отношениями «момент на единицу массы».

Управление будем производить изменением уровня подводимого напряжения посредством ШИМ. Для переключения полярности напряжения и реализации ШИМ в схему установлен коммутатор (К). Для сглаживания пульсаций в схему установлен фильтр. Система управления (СУ) построена на основе классических систем подчиненного регулирования [4] с тремя контурами: контур модуля вектора тока статора (Пи-регулятор), скорости (ПИ-регулятор) и положения вала двигателя (И-регулятор, построенный для режима «малых» перемещений). Преобразователь (Пр) преобразует сигналы от датчиков тока в фазах в систему координат α, β и вычисляет модуль тока согласно выражению:

$$|i_s| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}.$$

Система управления имеет следующие параметры: частота ШИМ – 6 кГц; частота контура тока – 1,5 кГц; частота контура скорости: 750 Гц; частота контура положения: 312,2 Гц.

Приведем математическую модель бесколлекторного двигателя постоянного тока при питании фаз напряжениями несинусоидальной формы, без учета коммутационных процессов и регулированием ослаблением поля [3].

Уравнения для токов в фазе:

$$\begin{aligned} \frac{2}{3} L_s \frac{di_1}{dt} + i_1 R_s + \left(\frac{3}{\pi} \right)^2 \cdot Z \cdot k_{01} \Phi \omega \cdot \sin(\gamma_e) &= \\ &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_{dc} \sin(\gamma_e); \\ \frac{2}{3} L_s \frac{di_2}{dt} + i_2 R_s + \left(\frac{3}{\pi} \right)^2 \cdot Z \cdot k_{01} \Phi \omega \cdot \sin\left(\gamma_e - \frac{2}{3}\pi\right) &= \\ &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_{dc} \sin\left(\gamma_e - \frac{2}{3}\pi\right); \\ \frac{2}{3} L_s \frac{di_3}{dt} + i_3 R_s + \left(\frac{3}{\pi} \right)^2 \cdot Z \cdot k_{01} \Phi \omega \cdot \sin\left(\gamma_e + \frac{2}{3}\pi\right) &= \\ &= \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_{dc} \sin\left(\gamma_e + \frac{2}{3}\pi\right), \end{aligned}$$

где L_s , R_s – индуктивное и активное сопротивление фазы обмотки двигателя; i_1, i_2, i_3 – действующее значение тока в фазе; Z – число пар полюсов; k_{01} – обмоточный коэффициент фазы, умноженный на число витков; Φ – поток магнита в зазоре на пару полюсов, сцепленный с фазой; γ_e – электрический угол поворота ротора.

Электромагнитный момент:

$$M = Z \cdot k_{01} \Phi \cdot \left[i_1 \cdot \sin(\gamma_e) + i_2 \cdot \sin\left(\gamma_e - \frac{2}{3}\pi\right) + i_3 \cdot \sin\left(\gamma_e + \frac{2}{3}\pi\right) \right].$$

Уравнение динамики и выражение для угла поворота ротора в электрических радианах:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c;$$

$$\gamma_e = \theta_0 + Z \cdot \int \omega dt,$$

где θ_0 – начальное положение вала ротора.

Шаг человека моделировался на основании экспериментальных данных [5].

На рисунке 2 приведено два графика: желаемое и полученное перемещение коленного сустава. Как видно из рис. 2, они совпадают.

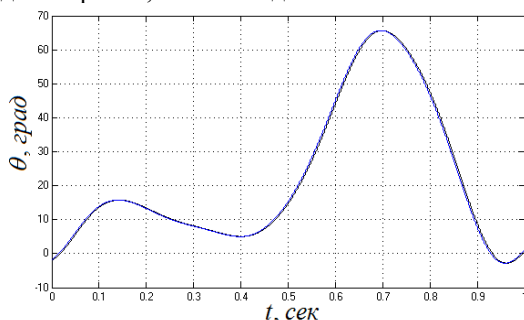


Рис. 2. Графики положения коленного сустава, полученные на модели с обобщенным преобразователем

На рисунке 3, приведен график угловой скорости вращения двигателя. Максимальный размах пульсации угловой скорости ротора составляет 50 рад/с. На выходе редуктора с передаточным числом равным 100, размах

пульсаций составит 0,5 рад/с, что не влияет на работу экзоскелета коленного сустава. При этом колебания могут быть демпфированы четырехзвенным механизмом, не учтенном при моделировании системы.

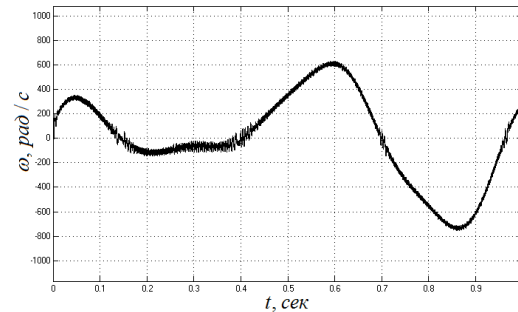


Рис. 3. График угловой скорости вращения ротора полученные на модели с ШИП

Вывод

Вентильный электропривод применим в электромеханической системе экзоскелета коленного сустава.

Список использованных источников

1. Воробьева А.А. Спорные вопросы терминологии и классификации экзоскелетов (аналитический обзор, собственные данные, уточнения, предложения) / А.А. Воробьев, Ф.А. Андрущенко, О.А. Пономарева, И.О. Соловьева, П.С. Кривоножкина // Волгоградский научно-медицинский журнал 3/2015 – с. 14-20
2. Николенко М. Н. Подходы к разработке электромеханического узла медицинского экзоскелета коленного сустава / М. Н. Николенко, Д. А. Котин // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : тр. 7 Всерос. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 23–24 нояб. 2016 г. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2016. – С. 187–192. – 50 экз. – ISSN 2220-3699.
3. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников: Курс лекций. – СПб: Корона-Век, 2006. – 336 с.: ил.
4. Виноградов А.Б. Векторное управление приводами переменного тока // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
5. Труханов К. А. Анализ кинематики коленного модуля с гидравлическим исполнительным механизмом и сопоставление результатов расчета с поведением коленного сустава человека при ходьбе / К. А. Труханов, Р. А. Прокопенко // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2014. № 11. С. 52–71.